

국내 P2H(Power-to-Heat) 활성화 방안

진 태 영 에너지경제연구원 부연구위원(tyjin@keei.re.kr)



1. 서론

기후변화 대응을 위해 탄소중립의 필요성이 대두됨에 따라 탄소중립 정책의 주요 개혁부문인 에너지 부문에서 다양한 수단들이 제시되고 있다. 전세계 온실가스 배출량 중 약 75% 정도가 에너지 부문에서 발생하기 때문이다. 하지만 탄소중립을 위한 에너지 부문의 개혁에는 다양한 리스크가 수반된다. 전통적인 에너지 기술은 탄소집약적(carbon intensive) 기술인 경우가 많아 청정 에너지를 공급할 수 있는 새로운 기술을 도입할 필요가 있는데, 청정 에너지는 기술의 성숙도가 미진한 측면이 있으며, 이로 인해 경제적인 측면에서 불확실성이 높다. 이러한 불확실성 하에서 탄소중립이라는 도전적인 목표를 비용효과적으로 달성하기 위해서는 가용한 에너지 부문의 기술을 모두 활용해야 할 것으로 보인다. 이러한 환경에서, 섹터 커플링(sector coupling) 기술의 활용가능성이 제시되고 있다.

섹터 커플링 기술이란 가변성이 있는 재생에너지전력을 다른 형태의 에너지로 변환하여 사용·저장하

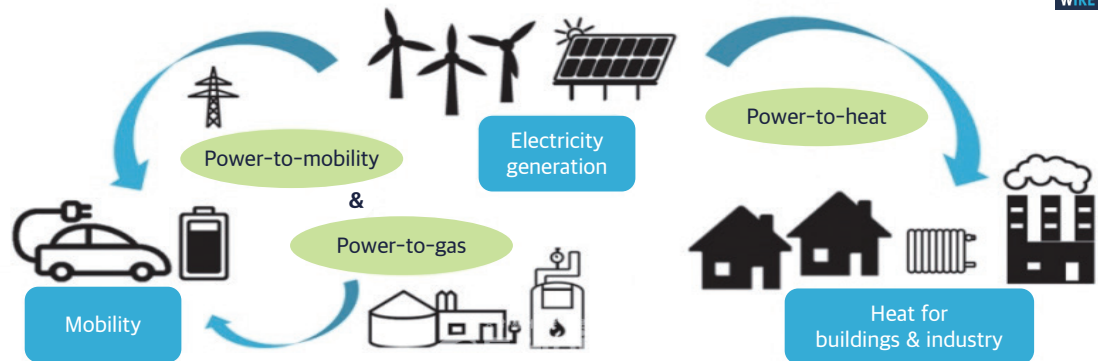
고 발전, 난방 및 수송부문을 연결하는 시스템을 의미한다¹⁾. 변동성 재생에너지(Variable Renewable Energy, VRE)는 인위적으로 생산량을 조절할 수 없어, 동시간대 전력수요 대비 재생전력 공급량이 초과할 경우 출력제한(curtailment)을 통해 생산량을 제한하거나 초과된 에너지만큼 저장하여 운용하는 등의 작업이 필요하다. 재생전력을 전력 형태 그대로 저장하는 예로 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS) 혹은 P2M(Power-to-Mobility)²⁾를 들 수 있으며, 열에너지로 저장할 경우 P2H(Power-to-Heat), 수소로 저장하여 활용할 경우 P2G(Power-to-Gas)라 불린다.

국내에서는 섹터 커플링 기술을 적극적으로 활용할 필요가 있다. 전통자원의 편재성(ubiquity)으로 인해 석유가스 자원이 없어 전통적으로 자원 빈국이었던 우리나라는 에너지 수요의 92.8%³⁾를 수입에 의존해 왔으며, 지정학적 리스크에 국내 경제가 상당히 취약했다. 기후변화 대응과 에너지 전환정책을 통해 재생에너지가 확대되면서, 해외의존도를 낮추고 매장량 부족을 어느 정도 해소할 수 있으리라 기대했으나 우리나라는 재생에너지 잠재량 역시 타 국가에 비해 높지 않은 것으로 나타났다. 재생에너지는 태양광, 풍력 등 자연에서 생성되는 에너지를 활용하기 때문에, 에너지 자원의 편재성이 해소될 것으로 기대했으나 재생에너지 역시 생산을 위해 필요한 자원으로 토지가 있다. 본래화석연료와 같은 지하 자원을 채굴하기 위해서도 토지 취득비용(acquisition cost)이 필수적으로 고려되었다. 이와 마찬가지로 재생에너지 설비를 설치하기 위해 필요한 토지비용이 있다. 재생에너지 단위공급비용을 전통 발전설비와 비교하기 위한 균등화발전비용(Levelized Cost Of Electricity, LCOE)에서도 토지 취득비용은 고려되어야 하는 요인이다.

그림 1 섹터 커플링 기술 개념도

Sector coupling - an integrated energy system based on renewable electricity

CLEAN
ENERGY
WIRE



자료: CEW(2018), 류희선(2021.1), <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=233016>. 재인용

1) 이수민·김수린(2021), p.1.

2) P2M은 두 가지로 나뉜다: 재생전력 공급을 전기차로 흡수하는 단방향성 저장을 V1G라 부르며, 전기차 배터리로부터 계통에 전력을 공급해 유연성을 부여하는 양방향 섹터 커플링을 V2G(Vehicle-to-Grid)라 부른다.

3) 중앙일보(2022), <https://www.joongang.co.kr/article/25053466#home>, 2020년 기준,

이러한 점을 고려할 때, 우리나라는 토지도 한정적인 자원으로 분류될 수 있다. 국가 면적을 고려해봤을 때 우리나라의 인구밀도(면적대비 인구수)는 2021년 기준 약 531명/km²으로 세계 22위 수준⁴⁾이나 인구 1,000만 이상 국가끼리 비교할 경우 방글라데시, 대만 바로 다음 순위이다. OECD 국가로 한정할 경우 우리나라의 인구밀도는 세계 1위를 차지한다. 또한 인구와 에너지 소비량이 비례한다는 것은 자명한 사실이며, 우리나라는 연간 1인당 전력소비량도 2020년 기준 9,826kWh로 높은 편에 속한다⁵⁾. 요약하면 국내에는 재생에너지 발전을 위해 필요한 자원인 토지가 부족하며, 토지 대비 인구수가 높는데다가 인구 당 전력 소비량도 높은 편이다. 재생에너지만을 활용하여 에너지 수요를 충당하기에 불리한 환경이라 할 수 있다.

위와 같은 상황에서, 우리나라는 에너지의 낭비 없이 효율적으로 사용할 필요가 있다. 에너지 공급의 불안정으로 에너지 안보가 취약한 상황에서 생산된 에너지를 낭비하는 상황은 피해야 할 것이다. 전력은 발생전력과 소비전력이 일치해야 하는 동시성(simultaneity)을 가지고 있어 시간대별로 소비량 대비 초과 전력이 생산될 경우 초과생산 분만큼 에너지를 낭비하게 된다. 재생에너지 출력제한 관련 선행연구에 따르면 2040년 재생에너지 비중 30% 가정 시 출력제한으로 인해 낭비될 수 있는 전력이 연간 7.9TWh까지 발생할 수 있다⁶⁾. 낭비되는 전력량은 재생에너지 설비용량, 그리고 재생에너지 외 청정 발전원(연료전지, CCUS 발전)이 확대될 경우 더욱 증가할 수 있다.

위와 같이 낭비될 수 있는 에너지를 국내에서는 저장 혹은 전환하여 활용할 필요가 있다. 섹터 커플링 기술 중에서도 즉각적으로 도입이 가능한 P2H 기술을 고려해야 한다. 우리나라는 열에너지를 활용한 난방을 이미 사용하고 있으며, 지역난방 그리드 등 인프라가 확보되어 있는 편이다. P2H 핵심 기술이라 할 수 있는 보일러, 히트펌프, 축열조 등의 기술수준도 높은 편이라 기술 관련 지원정책이나 제도가 자리잡을 경우 효과적으로 재생에너지 잉여전력을 사용하는 데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 섹터 커플링 기술 중에서 P2H에 초점을 맞추어 기술 및 활용방안에 대해 살펴보고, 실제 해외 사업 사례를 소개하며 관련 지원정책 및 제도를 정리하여 P2H 활성화를 위한 기반을 구축하고자 한다. 본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 P2H 기술의 원리와 핵심기술에 대해 설명한다. 3장에서는 해외 선행연구 및 사례연구를 제시하고, P2H 관련 사업모델 및 지원제도를 기술한다. 4장에서는 정책제언과 함께 연구를 결론짓는다.

2. P2H 기술 개요

섹터 커플링 기술은 재생에너지 전력을 저장 혹은 다른 형태로 사용하는 기술로, 그 한 종류인 P2H 기술은 냉난방에 재생에너지 잉여전력을 열에너지 형태로 저장 및 변환하여 냉난방에 활용하는 기술이다. 전력을 열에너지로 바꿀 수 있는 기술인 히트펌프 및 전기보일러, 열에너지를 저장할 수 있는 축열조가 주요

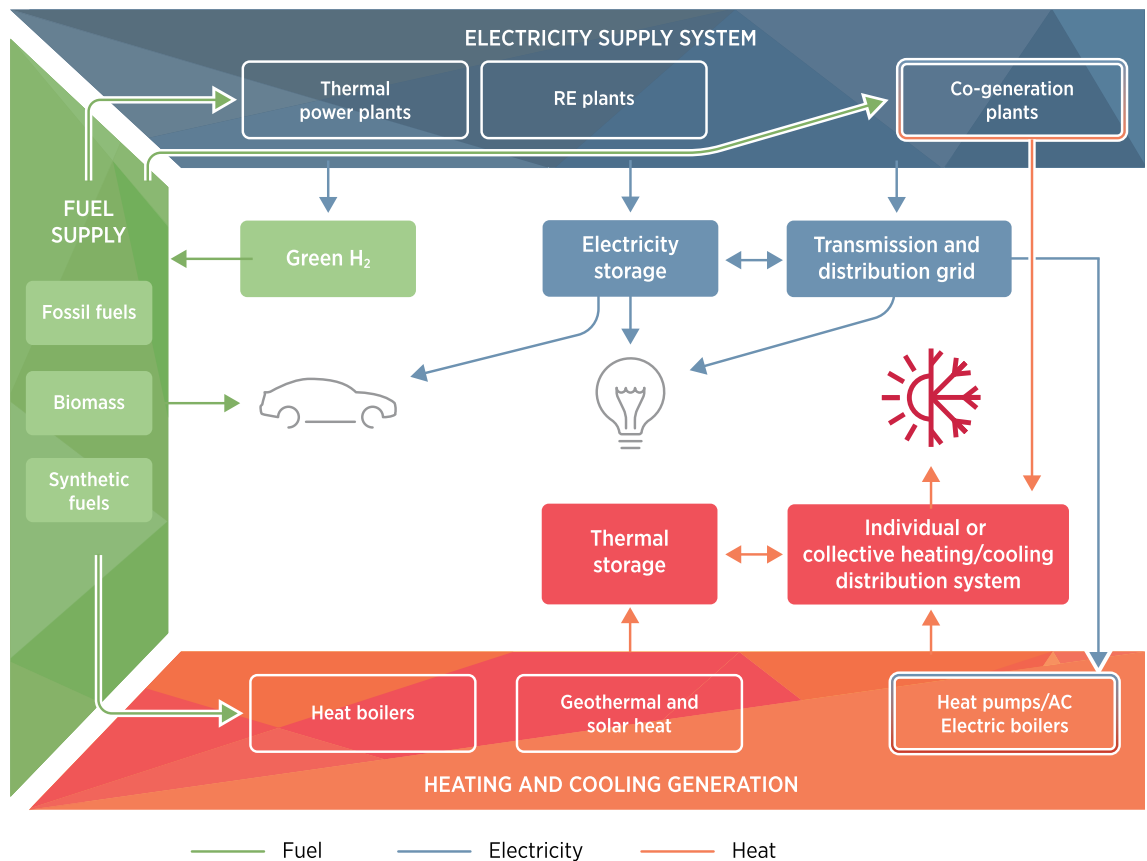
4) World Bank(2022), https://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.DNST?most_recent_value_desc=true.

5) OECD 주요국 통계에서 미국을 제외하고 가장 높은 수준이다(통계청, 2022a).

6) 이태의(2020), p.75.

P2H 기술이라 할 수 있다. 전기 보일러 중에서는 최근 즉각적인 급탕이 가능하여 유연성 자원으로 활용이 가능하며 효율이 높은 전극 보일러(electrode boiler)가 주목받고 있다. 시간대별로 발생할 수 있는 재생 에너지 잉여전력으로 실시간으로 히트펌프, 전기보일러를 활용해 난방이나 공정열로 소모하고, 즉각적으로 필요하지 않은 열에너지는 축열조에 저장해 열수요 발생 시 다시 꺼내어 쓰는 개념이므로 축열조를 일종의 열 배터리라고 생각할 수 있다. 전력과 냉난방 부문 간의 결합은 다음 [그림 2]와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2 전력과 냉난방 부문의 결합



자료: IRENA et al.(2021), p.34.

P2H 기술의 기대효과는 크게 세 가지로 볼 수 있다. 첫째로, 최대부하를 경감시킬 수 있는 효과가 있으며, 둘째는 에너지효율 향상 효과가 있다. 마지막으로, 온실가스 감축효과를 발생시킬 수 있다. 최대부하 경감의 경우, P2H는 수요반응 프로그램으로서 사용되어온 사례가 있다. 전력수요 부하가 높아졌을 때, 일종의 수요반응으로부터 열공급 설비를 가동하여 각 사례별로 최대부하와 전력소비량을 경감시킨 것으로 조사되었다(Gjorgievski et al., 2021). 단, 과거 사례는 재생에너지 전력을 활용한 P2H 개념이라고 보기는 어렵고 수요관리를 통한 재생에너지 전력의 효율적 활용이라고 할 수 있다.

1992년 미국 세크라멘토 주에서 유틸리티의 중앙 공조시스템으로부터, 라디오 신호를 활용하여 에어컨의 원격 사이클링을 통해 소비자들의 에너지 소비를 감소시키고, 소비자는 이 제도로부터 공조시스템에

대한 전기요금을 할인받은 사례가 있다. 19,130명이 참여하였으며 피크시간대 부하를 100MW 경감시키는 데 성공하였다(Banerjee, 1998). 동 연도에 미국에서는 두 건의 P2H 활용 최대부하 경감 사례가 있다. United Power Association Off-Peak Program과 Buckeye Power Residential Load Control인데, United Power Association Off-Peak Program의 경우 축열조, 온수난방, 그리고 이중연료 난방, 에어컨, 관개 펌프 등 전력소비를 활용한 수도시스템, 난방시스템을 활용해 부하관리를 시도한 결과 92MW의 피크를 경감시켰다.

Buckeye Power Residential Load Control 사례의 경우 라디오 신호를 통해 장비를 원격으로 시동 및 종료하면서 최대부하 시간 외에 축열조에 열을 저장하고, 최대부하 시간에는 전기를 활용한 난방이 중단되며 화석연료를 대신 사용하였다. 이는 이중연료 난방 시스템이 갖춰져 있었기 때문에 가능한 사례로, 이 사례에서는 온실가스 배출보다는 전기요금 및 부하관리에 더 초점을 맞춘 것으로 보이며, 총 95MW의 최대부하를 경감시킨 것으로 관찰되었다. 1993년 미국 휴스턴에서는 Houston Lighting & Power 유틸리티가 히트펌프를 사용하여 최대부하를 경감시키는 부하이전 P2H 파일럿 프로그램을 운영한 사례가 있는데, 이 프로그램에서는 히트펌프 한 대당 1.46kW의 최대부하를 경감할 수 있는 가능성이 있음을 도출하였다(Cook, 1994). 2004년 덴마크에서는 전기난방을 활용하는 가구를 대상으로 P2H 시스템을 도입해 전력소비를 감소시키고자 했는데, 가구당 5kW의 부하 감소를 확인하였다(Kofod and Togeby, 2004).

섹터 커플링 기술의 본래 목적 중 하나인 전력계통에 대한 유연성 부여 측면에서도 연구 사례가 존재한다. Gravelins et al.(2019)의 연구에 따르면 태양광 발전과 지역난방 그리드를 통합하여 P2H를 활용할 경우 전력계통 시스템의 유연성을 확장할 수 있다. 이 연구에서는 최적화 결과 지역난방 그리드와의 결합을 통해 태양광 발전의 약 47%가 열로 변환되어 사용된 것으로 나타났다⁷⁾.

두 번째 기대효과인 에너지효율 향상의 경우, 전력을 열에너지로 변환하여 사용함에 따라 발생할 수 있는 효율향상 효과이다. 주요 P2H 기술인 히트펌프의 경우 보조 열원 매개체에 따라 약 340%까지의 에너지 전환효율을 가져올 수 있는 것으로 알려졌다. 물론 P2H 효율은 히트펌프의 경우 기술수준에 따라 성능 계수(Coefficient Of Performance, COP)가 증가할 경우 달라질 수 있다. 다음의 [그림 3]은 P2H의 효율을 나타낼 때 가장 많이 사용되는 그림으로, 독일 연방경제에너지부(BMWi)에서 발표한 섹터 커플링 관련 효율을 나타낸다. 섹터 커플링 기술을 활용해 전력 그대로 활용, 열에너지 변환, 수송부문의 전환 시 약간의 에너지 손실은 발생할 수 있으나, 전력을 열로 전환하는 과정에서는 열원(ambient heat)에 따라 입력 에너지 대비 출력 에너지가 증가하여 효율이 100%를 초과할 수 있다는 뜻이다. 이는 엔트로피⁸⁾ 관점에서 고품질의 에너지(전력)를 저품질의 에너지(열)로 전환하기 때문에 나타나는 현상이다.

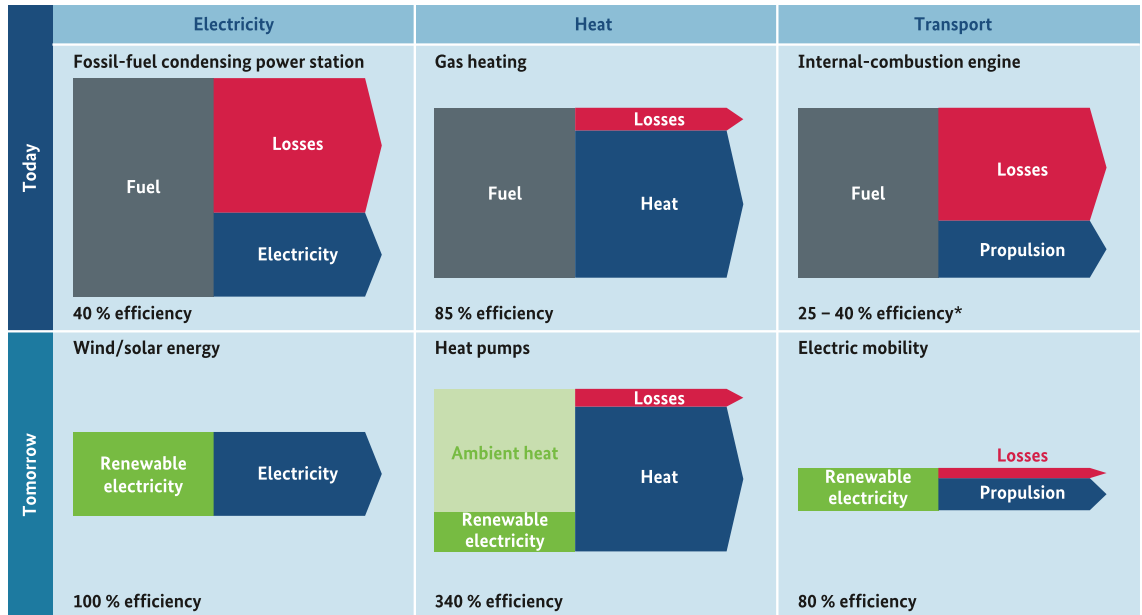
핀란드의 지역난방 시스템에 대한 사례연구로서, 변동성 재생에너지로부터 발생한 초과생산전력을 주거부문에서 열에너지로 저장 및 활용할 경우 에너지효율 개선효과와 비용절감 효과를 거둔 결과가 있다(Rasku and Kiviluoma, 2019). 하지만, 열에너지는 저장기간에 따라 손실률이 높아 효율이 저하되는

7) 정확한 지역난방 및 태양광의 용량이 나와있지 않고, 시스템 다이내믹스 분석을 활용하여 도출한 값을 의미

8) 엔트로피는 무질서도를 가리키며, 무질서도가 높을수록 에너지의 품질은 떨어진다. 무질서도가 높을수록 에너지를 원하는 방향으로 사용하기 어렵고 손실이 높아지기 때문이다.

특징이 있다. 전력으로부터 변환된 열에너지를 빠른 시간 내로 소비해야만 P2H로부터 에너지효율 향상 효과를 극대화할 수 있을 것이다(Sowmy and Prado, 2008).

그림 3 섹터 커플링 기술별 효율



자료: BMWi, 2015, p.86.

마지막 기대효과인 온실가스 감축효과의 경우, 기존의 열에너지 소비로부터 발생하는 온실가스 배출량을, 재생전력으로 대체함에 따라 발생하는 환경편익 효과이다. 재생에너지 전력으로 냉난방 수요를 충당하거나, 일부 대체할 경우 탄소중립을 위한 환경편익이 효과적으로 발생한다. 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면 전세계 최종에너지 소비 중 절반은 공정열을 포함한 열에너지 소비가 차지하고 있다(IEA, 2021). 이러한 난방을 위한 에너지소비 중에서 바이오매스 및 폐기물을 제외하면 청정 열에너지라 할 수 있는 태양열 및 지열은 약 10%에 불과하다. 또한, 2018년 기준 미국 냉난방수요의 60% 이상, 2019년 기준 유럽 냉난방수요의 75% 이상이 화석연료를 활용하여 에너지 공급을 충당하고 있다(IRENA, 2019).

국내 사례도 크게 다르지 않다. 국내 가정 및 상업부문을 포함하는 건물부문의 경우, 2021년 기준으로 에너지 소비량 비중을 살펴보면 전력 및 도시가스 비중이 월등히 높은 것으로 나타난다. 단, 전력 소비량은 냉난방 외에도 다양한 용도로 사용될 수 있으며, 건물 전력소비 용도별 비중을 살펴보면 전력소비 중 약 21.65%가 냉난방 용도로 사용된다⁹⁾. 이러한 점을 고려하면 건물부문 에너지 소비 중 대체관계에 있는 소비량은 냉난방 전력, 도시가스, 지역난방부문으로 나눌 수 있으며 도시가스 비중이 월등히 높은 것을 알 수 있다.

9) 최도영(2015), p.41. 냉동 및 공조를 제외하고 냉방, 난방, 취사, 온수만 포함

표 1 2021년 국내 건물부문 에너지소비량

에너지원	소비량(ktoe)	비중(%)
전력(냉난방 외)	13,917	40.5
전력(냉난방)	3,846	11.2
도시가스	13,940	40.6
지역난방	2,641	7.7
합계	34,344	100.0

자료: 국토교통부(2022), <https://www.greentogether.go.kr/sta/stat-data.do>.

도시가스는 천연가스를 연소시키는 1차 에너지 직접소비라 할 수 있으며, 전력 및 지역난방의 경우 전환된 2차 에너지로 다양한 1차 에너지원을 발전소 또는 보일러에서 전환시킨 에너지이다. 2021년 발전량 기준으로 화석연료(석탄, 가스, 유류) 비중은 63.9%에 달한다¹⁰⁾. 지역난방의 경우 2020년 기준 바이오매스를 제외하면 약 99.2%가 화석연료를 사용한다(LNG 96.3)¹¹⁾. 다르게 말하면, 냉난방용도 전력, 도시가스, 지역난방은 대부분이 화석연료로 공급되어 있어 탄소집약적인 에너지 소비를 보이므로, 이중 일부를 P2H를 활용해 청정 에너지로 대체하면 건물 부문에서의 온실가스 절감 효과가 상당히 크게 나타날 수 있다는 것이다.

IRENA(2019)에서는 P2H 기술에 대한 기대효과를 다섯 가지로 정리하였다. 각 기대효과별로 사례를 들어 구체적인 사례로 나타내면 <표 2>와 같다. 앞서 기술한 최대부하 경감, 에너지효율 향상, 온실가스 저감효과와는 다른 측면으로, P2H 사업으로부터 기대해 볼 수 있는 편익을 의미한다. 재생에너지 출력제한 감소의 경우 잉여전력을 전용으로 사용할 수 있는 P2H 설비를 설치하여 재생에너지를 낭비없이 열에너지로 전환해 사용함에 따라, 재생에너지 설비의 출력제어로 인해 낭비되는 공급량을 줄일 수 있음을 의미한다. 부하이전으로 인한 유연성 증가는 상기 기술한 최대부하 감소 편익과 같은데, 히트펌프, 전기보일러 및 축열조 설치를 통해 실시간으로 부하를 흡수할 수 있음을 뜻한다. 대용량 에너지저장의 경우 지역난방 네트워크와 연계한 대용량 축열조를 커뮤니티 레벨에서 설치하여 계간축열로 활용할 경우 에너지손실이 적은 대규모 섹터 커플링이 가능하다.

그리드 서비스 제공의 경우 전력부문의 수요반응제도와 같다. 시간대별로 전력 및 열에너지 가격이 달라지므로, 스마트 난방 시스템을 활용하여 난방 소비자에게 있어 최저비용으로 난방을 가능하게 한다. 이 서비스 안에는 소비자 측면의 편익극대화 뿐만 아니라 그리드의 부하감소 편익을 제공하는 방식으로도 설계가 가능하다. 자가소비 지역 재생에너지 증가의 경우, 자가소비용 태양광을 활용하여 전력으로 사용할지 난방으로 사용할지 선택할 수 있다. 단, 이것은 전력시장과 난방시장의 통합이 이루어져 동시에 모니터링이 가능하고, 두 에너지의 가격에 경합성이 있을 경우에만 바라볼 수 있는 기대효과이다.

10) 통계청(2022b), https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339.

11) 한국에너지공단(2022), p.33.

표 2 P2H 기대효과 및 사례

P2H 기대효과	사례	
재생에너지 출력제한 감소	(중국 에너지관리당국)	- 잉여전력 전용 50MW 전기보일러 설치 - 연간 지역난방 2.8% 비율 열생산
부하이전으로 유연성 증가	(독일 히트펌프)	- (평균) 히트펌프 1대 당 10.7kWh의 부하이전 잠재량 보유 - 축열조 없이는 부하이전에 한계가 있음.
대용량 에너지저장 (계절 간 활용)	(캐나다 알버타)	- 가구별 차고지에 1.5MW의 태양열 설치 - (여름) 지하 시추공 축열조에 저장 - (겨울) 각 가정에 분배
그리드 서비스 제공 (계통편익)	(영국 OVO Energy)	- 스마트 난방 시스템 - 소비자 난방 비용 최적화, 그리드 밸런싱 서비스 제공하는 원격 난방 저장
자가소비 지역 재생에너지 증가	(Battaglia et al., 2017)	- (소비자) 자가소비용 태양광과 히트펌프 연계로 전력비용 절감 - (유틸리티) 전력계통 부담 감소

자료: IRENA(2019), p.9. 바탕으로 저자 재정리

3. P2H 사업모델

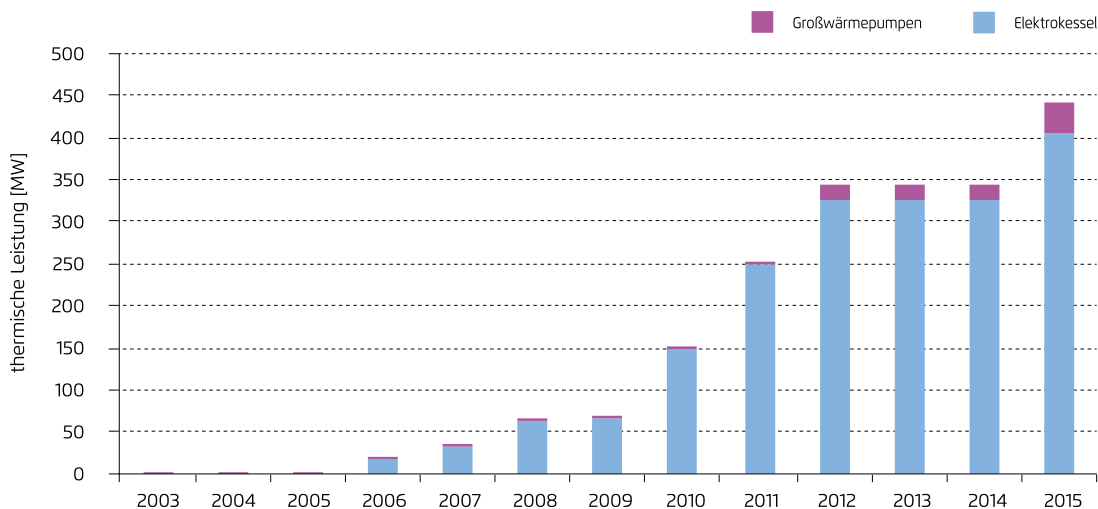
가. P2H 사업 해외사례

국내에서는 아직 P2H를 사업화한 사례가 없는 것으로 알려져 있다. 해외의 경우 유럽, 그중에서도 지역난방, 재생에너지 전력이 풍부히 공급되어 있는 국가를 중심으로 과거부터 많은 P2H 사업 사례가 있다. 최근 분석 사례가 있지는 않지만, 독일의 신재생에너지정책(Energiewende)을 지원하는 싱크탱크인 Agora Energiewende 에서는 독일 및 덴마크의 P2H 프로젝트를 정리하면서, 2015년 기준 덴마크는 44개 (405MW), 독일은 10개(245MW)의 P2H 프로젝트가 진행될 예정임을 밝혔다(Agora Energiewende, 2014).

[그림 4]에 과거 덴마크 P2H 기기별 용량 설치가 나와 있다. 하늘색 그래프는 전기보일러를 의미하며, 자주색 부분이 히트펌프를 의미한다. 2003-2005까지는 히트펌프만을 활용한 P2H 프로젝트가 진행되었던 것으로 보인다. 2006년부터는 급격히 전기보일러가 늘어나는 추세를 보였으나, 2012년부터는 히트펌프 활용이 확대되었다. 2012년부터 전기보일러를 활용한 사업이 주춤한 이유로는 정책적 환경을 들 수 있다. 덴마크에서는 당시 전기보일러를 활용한 열 저장에 대해 직접적으로 지원하지 않았기 때문에 기기 설치 및 운영비용을 열 판매수익으로 충당해야 했다. 이러한 상황에서 열에너지에 대한 세금 및 부과금으로 인해 수익성이 악화되면서 전기보일러를 활용한 P2H 사업 유인이 감소했기 때문이다. 그럼에도 불구하고 열병

합발전(combined heat and power, CHP)과 결합한 P2H 사업은 연료비 절감효과 등 타 편익이 발생할 수 있어 다시 사업개발이 이루어지고 있는 것으로 보인다.

그림 4 덴마크 P2H 과거 설치용량



자료: Agora Energiewende(2014), p.34.¹²⁾

대표적인 P2H 성공사례로 유럽의 몇 가지 사례를 살펴볼 수 있다. 덴마크의 Ringkøbing 및 Skagen 발전소, 스웨덴의 Vatenfall 발전소 사례가 그것이다. Ringkøbing 사례는 Ringkøbing-Skjern 지역에 설치된 지역난방 시스템과 연계한 P2H 사례로, P2H 설비는 전기보일러와 히트펌프를 모두 포함하고 있어 전기보일러와 히트펌프를 갖춘 하이브리드 P2H 시스템의 효과를 모두 살릴 수 있는 케이스로 여러 문헌에서 소개되고 있다(Johannsen et al., 2021; Gorroño-Albizu, 2020).

문헌에 따르면, Ringkøbing 지역은 덴마크 내에서 가장 큰 육상 풍력발전 설비용량을 갖추고 있는 지역으로, 2018년 기준 지역 내 전력 수요의 178%에 달하는 연간 생산능력을 보인다. 이는 즉, 해당 지역에서 변동 재생에너지 생산량이 수요를 초과하기 때문에 지역 내 에너지 시스템과 통합하여 전력수요를 관리해야 함을 뜻한다. 공급초과된 재생전력을 활용해 열로 전환하여 활용하는 P2H 콘셉트에 적합하다고 할 수 있다.

Ringkøbing P2H 시스템에서 전기보일러는 전력가격이 상당히 저렴할 때 최대부하(peak load) 조절 장치로 주로 사용된다. 현재 덴마크에서 고정물로 반영되는 전력망 비용이 전기보일러 운영비용의 상당 부분을 차지한다. 히트펌프의 경우 열원 매개체(ambient heat)를 공기로 활용하는 공기열 히트펌프이며, 연료로는 천연가스나 전력이 사용가능하다. 비용최소화 알고리즘에 따라 연료가 투입되고 있어 향후 탄소

12) 원문이 덴마크어로 작성되어 있음. 보라색 부분은 히트펌프를, 하늘색은 전기보일러를 의미하며, 세로축은 용량을 나타냄

세가 증가하는 등 연료비가 변동됨에 따라 천연가스 비중이 줄어들 수 있다.

<표 3>에 Ringkøbing 지역난방 시스템에 설치된 P2H 장치들의 용량과 효율 등이 나와 있다. 규모와 효율은 실제 Ringkøbing 지역난방 시스템의 P2H 장비용량이며, 운영비용 등은 덴마크 에너지청(Danish Energy Agency, DEA)의 지침서를 참고하여 작성된 것이다(DEA, 2016). Ringkøbing 플랜트에서는 지역난방 운영 현황의 과거자료를 보여주는 웹사이트를 운영한다. [그림 5]에 P2H가 결합된 Ringkøbing 지역난방 시스템의 CHP 플랜트 운영 그래프가 나와 있다. 겨울에 대한 자료를 활용해야 CHP 및 열저장 현황을 살펴볼 수 있기 때문에, 2022년 1월 1일부터 1월 7일까지 동절기 7일간의 그래프를 참고하였다.

표 3 Ringkøbing P2H 시스템 규모

기술	규모(용량)	효율	고정운영비용 (Fixed O&M)	변동운영비용 (Variable O&M)
천연가스 보일러	36.5MW	102.25%	2,000EUR/MW/y	1.10EUR/MWh
천연가스 CHP	10.5MWth	52%th 및 43.6%e	10,000EUR/MW/y	5.38EUR/MWh
천연가스 히트펌프	4.29MW	219%	10,000EUR/MWe/y	7.99EUR/MWh
전기 히트펌프	3.28MW	374%	2,000EUR/MWth/y	3.29EUR/MWh
전기 보일러	12MW	100%	1,100EUR/MW/y	0.80EUR/MWh
태양열	30,000m2	-	-	-
축열조	401.27MWh	-	-	-

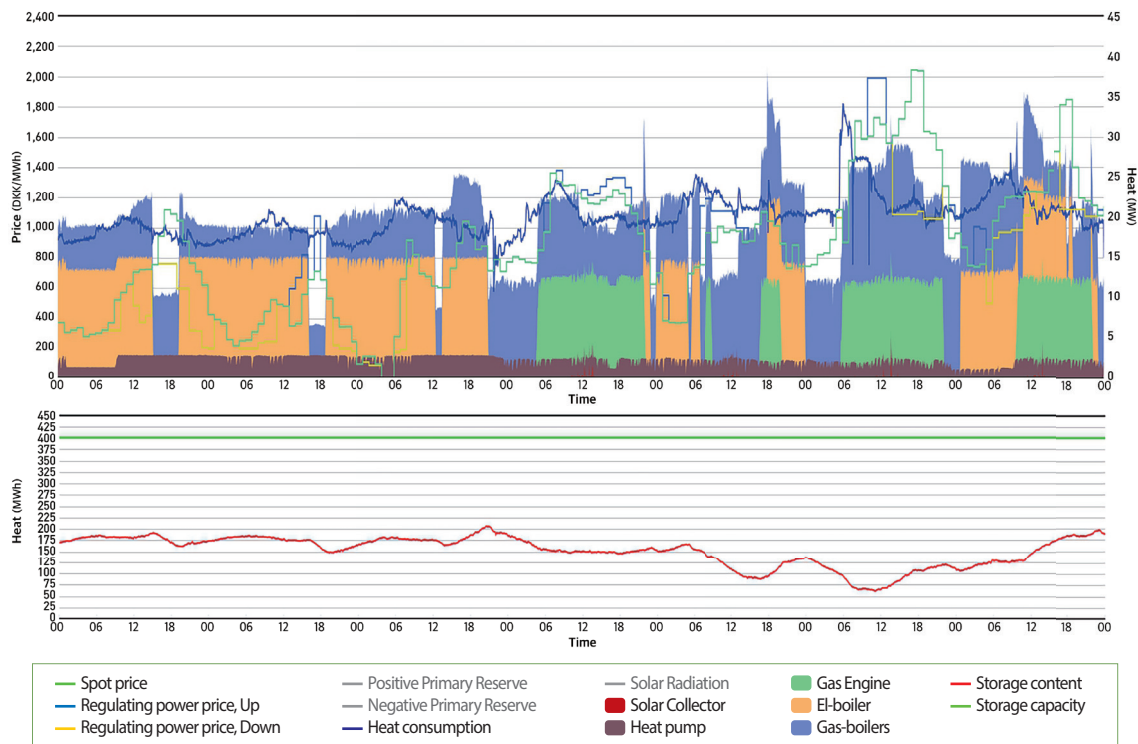
자료: Johannsen et al.(2021), p.5.

그래프를 살펴보면, 주황색 그래프가 전기보일러고, 가장 밑에 기저로 나타나는 갈색 그래프가 히트펌프를 나타낸다. 선 그래프 중 초록색 선 그래프는 전력 도매시장 현물가격을 나타낸다. 전기보일러는 전력 도매가격이 낮은 시점에만 가동하여 열에너지를 저장하는 것으로 나타난다. 히트펌프는 지속적으로 가동하여 축열조에 열에너지를 저장하는, 전력으로 말하면 기저부하라 할 수 있다. 전기보일러 가동에 따라 축열조의 열용량이 증가하는 반면, 전기보일러 가동이 없고 가스보일러만 가동하는 경우에는 축열조(빨간선 그래프)에서 열을 방출하는 것으로 보인다. 초록색 막대 그래프와 파란색 막대 그래프가 각각 CHP와 가스 보일러를 의미하는데, 전력 가격이 치솟을 때마다 CHP와 가스 보일러의 가동률이 증가하는 것을 볼 수 있다.

덴마크의 Skagen CHP 발전소와 스웨덴의 Vattenfall 사례도 동일한 형태의 운영방식을 가진다. 주변에 풍력 자원이 풍부하기 때문에 가능한 P2H 사업모델로 풍력 자원과 전기보일러, 히트펌프, CHP를

결합한 P2H 사업인 셈이다. Skagen CHP 발전소에서는 최근 대용량 히트펌프를 도입하여 P2H 사업에 사용하고 있다¹³⁾. 이 발전소도 발전 운영현황을 나타내는 웹사이트를 운영하고 있다. 스웨덴의 전력회사인 Vattenfall의 경우 독일 함부르크에서 풍력발전 단지를 운영하고 있는데, 풍력발전 출력이 과도한 경우에 전기보일러(45MW)를 가동하여 출력제한 없이 성공적으로 풍력발전소와 난방시스템을 운영하고 있다.

그림 5 Ringkøbing P2H 시스템 운영사례



자료: <https://www.emd.dk/plants/rfvv>

나. P2H 지원제도

P2H 기술은 타 섹터 커플링 기술 대비 현재 상용화가 가능한 설비로 실현이 가능하며, 국내 기술개발 여건 및 기존 보급설비 수준이 우수하기 때문에 즉각적으로 활용하여 타 섹터커플링 기술(e.g. V2G 및 P2G)이 상용화되기까지 기술적인 브릿지 역할을 할 수 있을 것으로 보인다. 이를 위해서는 빠른 시간 내에 지원제도를 파악하고, 국내 맞춤형 제도를 설계하여 보급을 촉진할 수 있는 기반을 마련하는 것이 필수적이다. 실제로 덴마크의 P2H 보급사례를 살펴보면, P2H 설비에 대한 보조금 혹은 에너지 관련 세금, 인센티브 등에 따라 P2H 설치 설비, 운영방식 등이 달라지는 것으로 확인되었다.

13) <http://www.energyweb.dk/skagen/?english&history>

Flex4RES(2016)에서는 P2H 사업을 활성화시키기 위해 다양한 동인을 정리하였다. 해당 목록은 CHP 및 P2H 운영사업자를 대상으로 한 설문조사 결과를 기반으로 한다. 본 연구에서는 CHP의 운영 활성화에 대한 동인은 제외하고 P2H만을 대상으로 정리한다. 그러나 실제로 CHP 사업 운영이 확대될 경우 P2H 사업의 기반이 되기 때문에 장기적으로는 함께 고려할 필요가 있다. <표 4>에 나열된 동인은 P2H 사업을 위한 재무적인 장벽을 완화시키는 보조 제도로서 작용할 수 있는 수단들을 의미한다. 해당 수단이 완화되지 않을 경우 운영 측면에서는 기존 열공급 혹은 냉난방 공급수단 대비 경쟁력이 없고, 그로 인해 투자유인이 부재하므로 도입 및 확대를 위해서는 선결되어야 할 것이다.

첫째로, 열생산을 위한 전력, 즉 P2H 대상으로는 공공서비스 의무(Public Service Obligation, PSO) 요금 등을 면제할 필요가 있다. 다르게 말하면, P2H 사업 운영자들은 전력을 구매해서 사용해야 하는데, 전력 소매요금에 유연성 자원 투자, 혹은 최대부하 경감을 위한 수요반응자원 투자, 계통보강을 위한 투자비용이 고려되어 있을 수 있다. P2H용도 전력에 대해서는 이와 같은 PSO 요금을 면제할 필요가 있다.

둘째로, 열생산을 위한 전력 대상 전력망 계통 이용료, 기타 부과금 및 세금 면제 사항이 있다. K-RE100 수행을 위한 국내 전력 PPA 구매 시 망이용료, 그리고 부과 세금 성격을 띠는 것은 기후환경요금이 있는데, 섹터 커플링을 위한 전력 구매 시에는 이러한 이용료 혹은 세금 면제 사항이 활성화에 도움이 될 것이다.

셋째로, 전기보일러, 히트펌프에 대한 전기 관련 세금 감면 혹은 초기투자비용 보조를 위한 보조금 지급이 있다. 전기 관련 세금의 경우 사업장에서 지출하는 전기요금이 부가가치세 과세 대상으로 이를 면제시키는 방법이 있을 수 있으며, 보조금 지급의 경우 전력 관련 고효율기기 보급을 위한 보조금으로 해결이 가능하다. 이와 연계할 수 있는 제도로 한국전력공사에서 시행 중인 고효율기기 보급 지원제도가 있으며, 에너지효율투자 의무화제도(Energy Efficiency Resource Standard, EERS)의 지원제도를 활용할 수 있다. 실제로 P2H에 에너지 효율 향상효과가 있을 수 있으므로, 해당 사업은 고려될 수 있으나, 국내 EERS는 에너지 소비자를 대상으로 지원사업을 수행하므로 제도 연계 가능성은 점검해 볼 필요가 있다.

마지막으로, 청정 열에너지에 대한 우선순위 부재 사항은 폐기물, 태양열, 바이오매스, 지열 등의 열에너지를 우선적으로 공급토록 하거나(RHO) 해당 열원에 보조금을 제공하는(RHI) 제도가 있을 경우 P2H의 투자유인이 상대적으로 떨어질 수 있음을 의미한다. 국내에서는 아직 신재생열 관련 제도가 도입된 사례가 없으며, 향후 섹터 커플링 기술의 중요도를 고려하여 신재생열 관련 제도 논의 시 P2H 기술에 대해 함께 고려해야 할 것으로 생각된다.

표 4 P2H 활성화 동인

동인	설명	운영측면
열생산을 위한 전력 대상 공공서비스 의무(PSO) 해제	PSO는 재생에너지 투자 계획 지원비용 충당을 위한 전력소비에 대한 부과금	PSO 등이 한계운영비용을 증가시켜 P2H의 경쟁력 하락
열생산을 위한 전력 대상 전력망 계통 이용료(Grid Tariffs) 면제	지역난방 시스템에서 P2H 전기 사용 시 송배전 요금을 의미	그리드 요금이 한계운영비용을 증가시켜 P2H의 경쟁력 하락

동인	설명	운영측면
열생산을 위한 전력 대상 기타 부과금 또는 세금 면제	에너지세/전기 관련 환경세 등	추가 부과금이 한계운영비용을 증가시켜 P2H의 경쟁력 하락
(전기보일러, 히트펌프) 전기 세금 감면	전기 관련 세금이 존재하는 경우를 의미	전기보일러, 히트펌프에 대한 전기세 인하를 통한 한계운영비용 감소
(전기보일러, 히트펌프) 보조금	P2H 용도 목적의 설비에게만 보조금을 지급(e.g. 초기투자금)	보조금을 통해 한계입찰가격을 단기 한계비용으로 이동시키면 P2H 설비의 경쟁력과 전력시장 참여도가 높아짐.
청정 열에너지*에 대한 우선순위 부재	청정 열에너지에 대한 규제를 통한 우선순위 배정	특정 열원 우선순위는 다른 열원 투자 동인을 증가시켜 P2H 장비 수익성 감소

*: 청정 열에너지란 폐기물, 태양열, 바이오매스, 지열 등을 의미

자료: Flex4RES(2016), pp.16-18. 바탕으로 저자 재정리.

4. 시사점

본 연구에서는 P2H 기술을 소개하고, 해외 사업 사례와 투자를 위한 환경조성에 필요한 사항을 정리하였다. P2H 기술은 상기 기술한 대로 섹터 커플링 기술 중 국내에서 빠른 시일 내에 도입이 가장 용이한 기술이다. 국내에는 건물부문에 지역난방 사업이 이미 활성화되어 있으며, 전기보일러 및 히트펌프 등 기술적인 성숙도도 갖추어져 있기 때문이다. 해외 사례를 살펴보면, 국내에서 P2H 운영에 활성화가 필요할 것으로 생각되는 것은 재생에너지 전력의 공급량 증가와, 전력시장 시간대별 입찰제도가 있을 수 있다. 시간대별로 전기요금에 따라 전기난방을 활용한 전력을 저장할지, CHP 가동률을 높여 난방을 공급할지 등 지역난방 사업자가 요금을 모니터링하고 실시간으로 전략을 세워야 하기 때문이다.

P2H 활성화를 위한 지원정책을 살펴보면, 크게 P2H 대상 전기요금 및 세금감면, 설비투자관련 보조금 지급, 청정 열에너지 지원제도로 나눌 수 있다. 다양한 정책도구를 활용할 수 있을 것으로 판단되나 현재로서 도입이 용이한 제도는 전기보일러 및 히트펌프 투자에 대한 보조금이나 세금감면, 저리용자 제도 등이 있을 것으로 생각된다. 설비투자에 대한 보조금은 기존에 있는 에너지효율 투자사업과 연계도 가능하다. 전기요금이나 세금에 대한 감면의 경우 RE100의 사례를 보면 알 수 있듯이 P2H에 필요한 재생에너지 전력은 일반 전력보다 프리미엄의 가격으로 거래되기 때문에 P2H가 경쟁력을 가지기 어렵다. 반면에 과도한 전기요금 및 세금감면을 통해 P2H 전용 재생전력의 가격이 일반전력 대비 저렴하게 형성될 경우 필요 재생전력 이상으로 재생에너지를 구매하여 열로 전환하는 등 재생전력 소비를 최적화하지 못할 우려가 있다. 시간대별 입찰제도가 도입되지 않는 이상 국내에서는 P2H 전용 재생에너지 설비를 연계하는 것이 가장 바람직할 것으로 보인다.

국내에 적용이 용이한 사업모델로는 ① 자가소비 태양광 연계형 히트펌프 및 전기보일러 P2H, ② 대형 전기보일러, CHP 연계 활용 P2H, ③ 가구별 소규모 히트펌프 P2H, ④ 지열냉난방 연계 P2H 등이 있다. 모든 사업모델에서는 공통적으로 대형 축열조 활용이 필수적이다. 자가소비 태양광의 경우 대형 축열조를 공유하는 것도 고려해볼 만하다. 가구별 소규모 히트펌프는 수요관리형 스마트 전력 및 열부하 시스템을 통해 소비자가 자발적으로 냉난방원을 선택하는 사업모델이다.

마지막으로, 국내에서는 P2H 설비로 분류되는 전기보일러, 히트펌프, 축열조 등의 보급에 앞서 난방 시스템을 개선할 필요가 있다. 지역난방이 활성화된 유럽에서는 일찍이 저온 지역난방의 중요성을 인식하고 관련 기술 및 사업에 재원을 투자하고 있다. 현재 우리나라의 지역난방 시스템은 3세대로, 100°C 이상의 고온수를 공급하는 구조인데 반해, 재생전력과 히트펌프 등을 활용하는 경우 80°C 내외의 저온수가 생산된다. 전기보일러를 활용하면 온도는 올라갈 수 있으나 장기적으로 효율이 떨어진다. 따라서 히트펌프, 축열조를 활용한 P2H 사업은 4세대 지역난방 보급과 같이 이루어져야 할 것으로 보인다. 4세대 지역난방은 난방 배관뿐만 아니라 건물 자체의 단열성능이 향상되어야 하므로, 국내에서 추진 중인 제로에너지 건축, 그린 리모델링 사업 등은 4세대 지역난방의 활성화에 도움이 되는 사업이라 할 수 있다. 향후 P2H 관련 대표 사업모델을 구상하고, 사업모델 활성화에 필요한 국내 지원제도, 국내 건물부문의 단열성능 향상 등을 함께 추진해야 할 것이다.

참고문헌

국내 문헌

- 이수만·김수린, “섹터커플링의 개념 및 적용 현황,” 세계에너지시장 인사이트 제21-11호, 에너지경제연구원, 2021
- 이태의, “재생에너지 변동성 대응을 위한 P2G 활용방안 연구,” 에너지경제연구원 기본연구보고서 20-12, 2020
- 최도영, “건물 에너지소비 상설표본조사 연구(2차년도),” 에너지경제연구원 기본연구보고서 15-22, 2015
- 한국에너지공단, “2021 집단에너지사업 편람”

외국 문헌

- Agora Energiewende, “Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien,” 2014
- Banerjee, R., “Load management in the Indian power sector using US experience,” Energy 23(11), 1998, 961-972,
- Battaglia, M., Haberl, R., Bamberger, E., and M. Haller, “Increased self-consumption and grid flexibility of PV and heat pump systems with thermal and electrical storage,” Energy Procedia, 135, 2017, 358-366.
- DEA, “Technology data for energy plants for electricity and district heating generation,” 2016

외국 문헌

- BMWi, "An Electricity Market for Germany's Energy Transition," White Paper by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2015
- CEW, "Sector coupling – Shaping an integrated renewable energy system," 2018, <https://www.cleane-energywire.org/factsheets/sector-coupling-shaping-integrated-renewable-power-system>
- Cook, J. D., "Residential air conditioner direct load control" energy partners program," Proceedings of Ninth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climate, 1994, Arlington, Texas.
- Dragoon, K., "Thermal Energy Storage: The Quiet Revolution," 2017, Flink Energy Consulting
- Flex4RES, "Framework conditions for flexibility in the district heating-electricity interface," WP2 Framework conditions, 2016
- Gjorgievski, V. Z., Markovska, N., Abazi, A., and N. Duić, "The potential of power-to-heat demand response to improve the flexibility of the energy system: An empirical review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 138, 2021, 110489
- Gorroño-Albizu, L., "The Benefits of Local Cross-Sector Consumer Ownership Models for the Transition to a Renewable Smart Energy System in Denmark: An Exploratory Study," Energies 13, 2020, 1508
- Gravelins, A., Pakere, I., Tukulis, A., and D. Blumberga, "Solar power in district heating. P2H flexibility concept," Energy, 181, 2019, 1023-1035
- IEA, "Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector," 2021
- IRENA, "Innovation landscape brief: Renewable power-to-heat," 2019
- IRENA, IEA, and REN21, "Renewable Energy policies in a Time of Transition: Heating and Cooling," 2021
- Johannsen, R. M., Arberg, E., and P.Sorknsæs, "Incentivising flexible power-to-heat operation in district heating by redesigning electricity grid tariffs," Smart Energy, 2, 2021, 100013
- Kofod, C., and M. Togby, "Demand Response offered by households with direct electric heating," Conference Proceedings of Nordic Energy Resources, 2004, Demand response Energy Mark
- Ramsebner, J., Haas, R., Ajanovic, A., and M. Wietschel, "The sector coupling concept: A critical review," Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 10(4), 2021, e396
- Rasku, T., and J. Kiviluoma, "A Comparison of Widespread Flexible Residential Electric Heating and Energy Efficiency in a Future Nordic Power System," Energies, 12(1), 2019, 5
- Sowmy, D. S., and R. T. A. Prado, "Assessment of energy efficiency in electric storage water heaters," Energy and Buildings, 40(12), 2008, 2128-2132

웹사이트

- 국토교통부, 녹색건축통계: 건물에너지통계, 그린투게더, 2022, <https://www.greentogether.go.kr/sta/stat-data.do> (접속일: 2022.08.13.)
- 류희선, 재생E 잉여전력, 열로 활용한다, 투데이에너지, 2021.1, <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=233016>(접속일: 2022.08.13.)
- 조현숙, 러 원유 금수 여파는 韓 에너지 93% 수입 의존 '초비상', <https://www.joongang.co.kr/article/25053466#home>(접속일: 2022.08.14.)
- 통계청, E-나라지표: 1인당 전력소비량, 2022a, <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4291> (접속일: 2022.08.12.)
- 통계청, E-나라지표: 에너지원별 발전량 현황, 2022b, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339(접속일: 2022.08.13.)
- World Bank, Population density, 2022, https://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.DNST?most_recent_value_desc=true(접속일: 2022.08.13.)